

考虑地形起伏的气温插值研究

王长青¹, 方奕舟², 熊育久^{1,3,4}

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 广州市珠江前后航道流域事务中心, 广东 广州 510641; 3. 中山大学 水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000)

摘要: 气温是地球水热过程的关键因子, 反映着气候变化, 对气温进行准确测量以探明其时空分布特征对水热研究和气候变化研究具有重要意义。空间插值是获取气温空间分布的重要手段, 但地形(如海拔)严重影响气温的空间插值结果, 制约了气温空间分布数据的准确性。为深入探讨海拔对气温空间插值结果的影响, 以地形起伏较大的黄土高原为研究对象, 基于研究区的33个国家气象站观测数据、1 km SRTM 和 DEM 数据, 系统研究了不同时间尺度下(逐小时、日、月)海拔校正对气温插值结果的影响。结果表明: 在小时、日、月3种时间尺度下, 气温空间插值结果考虑海拔校正与否存在明显差异, 其差值随着海拔的增加而增大; 当海拔低于1 000 m时, 地形校正前后气温月尺度差异相对较小(均值低于0.5 °C), 当海拔超过2 000 m时, 地形校正前后气温差异可达3 °C, 当海拔超过3 000 m时, 其差异高达6 °C; 随着时间尺度从逐时到逐日、逐月变化, 海拔对气温空间插值结果的影响有弱化趋势。

关键词: 气温; 空间插值; 反距离权重法; 地形校正; 数字高程模型(DEM); 黄土高原

中图分类号: P423

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0017-08

Temperature interpolation considering terrain fluctuations

WANG Changqing¹, FANG Yizhou², XIONG Yujia^{1,3,4}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Affairs Center of Pearl River Basin Front and Rear Channel, Guangzhou 510641, China; 3. Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

Abstract: Temperature is directly affected by the earth's energy process and is an important indicator of climate change, the accurate measurement and the grasp of spatiotemporal distribution of temperature is of great significance for the study of energy process and climate change. Spatial interpolation is an important method to obtain temperature spatial distribution; however, terrain fluctuations affect the interpolation results greatly, which restricts the accuracy of estimated data of spatial temperature. To address such challenge, we performed a case study to test temperature interpolation with and without considering terrain fluctuations in the Loess Plateau with huge elevation variations. Based on the temperature observations from 33 national meteorological stations and Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model (DEM) of 1 km, differences between temperature values interpolated with and without considering terrain fluctuations were systematically studied at hourly, daily, and monthly scales, respectively. The results show that at these three scales, the interpolation results vary greatly before and after terrain correction, and the difference increases with the increase of elevation. When the elevation is below 1, 000 m, the temperature difference before and after terrain correction is relatively small (the mean value is less than 0.5 °C), whereas it can reach 3 °C when the elevation exceeds 2, 000 m, and 6 °C when the elevation is greater than 3, 000 m at monthly scale. Moreover, the influence of elevation fluctuations on interpolation results tends to weaken when the temporal scale changes from hourly to daily and to monthly.

收稿日期: 2022-10-07; 修回日期: 2022-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071395、U1911204、51861125203)

作者简介: 王长青(1996—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源水生态。

通讯作者: 熊育久(1982—), 男, 贵州麻江人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文研究。

Key words: temperature; spatial interpolation; inverse distance weighting method; terrain correction; digital elevation model (DEM); Loess Plateau

1 研究背景

气温作为反映气候变化的关键气象因子之一,是生态环境相关科学研究的基础数据^[1-6],特别是在生态系统较为脆弱的黄土高原地区,准确掌握气温及其变化对黄土高原地区生态恢复等应用具有重要意义^[7-9]。

空间插值是获取气温空间分布的重要手段^[10-12]。目前,气温空间插值方法主要有传统插值方法(反距离权重法、普通克里金法、样条插值法、趋势面法)、数字高程模型(digital elevation model, DEM)多元线性回归插值以及基于DEM修正的空间插值方法^[13-16]。空间插值的精度取决于对区域的空间相关性以及空间异质性的数学表达,传统的空间插值方法对空间相关性的考虑较多,对海拔、坡向等能够体现空间异质性的因子考虑较少^[17],在地形平坦的区域,气温空间插值效果较好^[18-20]。但是,在地形起伏大、空间异质性较高的丘陵、高原地区,传统空间插值方法的结果难以反映空间异质性,气温插值精度不高^[21],这是因为在地形复杂区,地形因子特别是海拔严重影响着气温的变化^[22-23]。目前,考虑地形因子(海拔、坡度、坡向等)的插值方法,在一定程度上提高了气温在山区等空间异质性较强区域的空间插值精度^[24],但不同海拔范围内海拔校正与否对气温空间插值结果的定量影响尚不清楚,且不同时空尺度如何影响气温空间插值结果也不明确。

为此,本文选择地形起伏变化大的黄土高原,基于国家气象站逐小时气温观测数据,以反距离权重法为基础,在探讨不同插值空间尺度如何影响气温空间插值结果的基础上,系统探讨不同海拔对气温空间插值结果的影响,为准确获取地形起伏地区气温空间数据提供理论与方法支持。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

研究区位于黄土高原,地理范围在101.7°~113.7°E、34.3°~40.9°N之间,研究区海拔变化及国家气象站分布如图1所示。黄土高原属于大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,多年平均气温在3.6~14.3℃之间,多年年均降水量在150~800mm之间,约有69.33%的降水集中在6—9月^[25-26]。

其地势西北高、东南低,地形起伏、千沟万壑,主要地形地貌类型有黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区、河谷平原区、风沙区和土石山区^[26]。研究区海拔在30~4812m范围内,平均海拔为1453m。

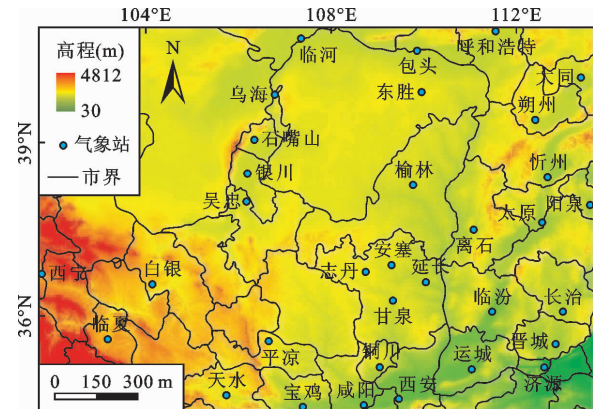


图1 研究区海拔及国家气象站分布

2.2 研究方法

(1)反距离权重法。反距离权重法基于地理学第一定律^[27],认为在空间上越靠近的事物或现象越相似,根据点位观测值可估算其周围空间的结果^[28],其气温估算公式如下:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (1)$$

式中: Z 为气温估计值,℃; n 为观测站点数量; Z_i 为观测点 i 的实测气温值,℃; d_i 为插值点与观测点之间的欧式距离; p 为欧式距离的幂,有研究表明 p 取2时插值效果较好^[29-30],因此本文取 $p=2$ 。

(2)考虑DEM差异的反距离权重法。公式(1)未考虑地形等因素对气温插值的影响,需要进行地形校正。假定海平面的气温变化是连续的^[31],因此通过海拔气温直减率可将地形复杂区域的实测气温数据还原至海平面,再通过DEM的海拔数据将海平面气温插值结果还原至实际高程处的气温,实现地形校正(公式(2))。其中,因海拔气温直减率受地形地貌以及季节变化影响,不是定值^[32-34]。所以需要考虑各气象站之间的空间差异,建立研究区各气象站点的观测气温与海拔之间的线性回归模型,获得研究区的气温直减率。

$$T_{a_{dem}} = Z_s - A \cdot H \quad (2)$$

式中: $T_{a_{dem}}$ 为地形校正后的气温,℃; H 为海拔,m; A 为海拔气温直减率,℃/100m; Z_s 为海平面气温空间插值结果,℃。

可利用气温直减率还原的海平面气温 T_{a_0} , 计算公式如下:

$$T_{a_0} = Z_i + A \cdot H \quad (3)$$

(3) 分析方法。本文利用独立样本 t 检验 (independent t test) 分析地形校正前后气温的差异。

2.3 数据来源及处理

(1) 数字高程模型 (DEM)。本研究采用 1 km 的 SRTM (shuttle radar topography mission) DEM 数据 (V4.1 版本), 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。

(2) 气温数据。研究采用的 2021 年 5 月 33 个国家气象站点逐小时气温数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。因为在黄土高原地区, 春季 (3—5 月) 气温是植被生长的关键影响因素, 直接影响生态系统的结构与功能^[35], 且植被生长多集中在 4 月下旬和 5 月^[36-37], 故以 2021 年 5 月 (完整月) 日间的观测数据, 在时、日、月 3 种时间尺度上, 探讨海拔对气温空间插值结果的影响。将获取的气温数据作如下处理: ①根据研究区中心点的经纬度坐标计算得到 5 月份的日出日落时间 (06:00—19:00) 作为白天, 将白天时段的气温做平均处理得到各站点的小时、日、月 3 种尺度的平均气温, 分别建立各时间尺度下平均气温与海拔之间的线性回归模型, 得到各时间尺度下的气温直减率。②不考虑地形影响采用反距离权重法插值时, 将包含经纬度坐标信息的各站点不同时间尺度的平均气温生成矢量文件, 利用 ArcGIS 中的反距离权重法插值工具, 插值得到不同时间尺度的气温栅格数据 (空间分辨率为 1 km)。③考虑地形影响采用反距离权重法插值时, 根据公式 (3) 计算得到各站点不同时间尺度的海平面气温并生成矢量文件后, 利用 ArcGIS 中反距离权重法插值工具得到不同时间尺度的海平面气温栅格数据, 并根据公式 (2) 在 ArcGIS 中计算得到不同时间尺度 DEM 修正后的气温栅格数据。

3 地形起伏对气温空间插值的影响

3.1 瞬时尺度

黄土高原地区的地形地貌千差万别, 且地形起伏较大, 为了探讨地形对气温空间插值结果的影响, 对 2021 年 5 月每日 12:00 时的瞬时气温插值结果进行讨论。图 2 为每日 12:00 时地形校正前后气温的小提琴统计图。图 2 显示, 经地形校正后气温均有明显下降, 且地形校正后的气温变化范围比较正前明显增大。可见, 海拔会显著影响气温空间插值的结果。

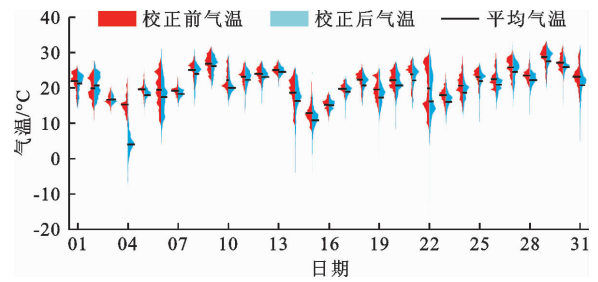


图 2 2021 年 5 月逐日 12:00 时地形校正前后气温的小提琴统计图

为进一步分析地形对气温空间插值结果的影响, 以 5 月 15 日 12:00 时的气温为例, 绘制不同海拔时地形校正前后气温的散点关系图, 如图 3 所示。由图 3 可知, 当海拔低于 1 500 m 时, 地形校正前后大部分气温的散点较为均匀地分布在 1:1 线附近; 当海拔超过 1 500 m 后, 地形校正前后的气温散点逐渐偏离 1:1 线, 且随着海拔的升高, 偏离的程度越来越大, 甚至完全偏离 1:1 线。可见海拔越高则地形校正前后的气温插值结果差别越大。

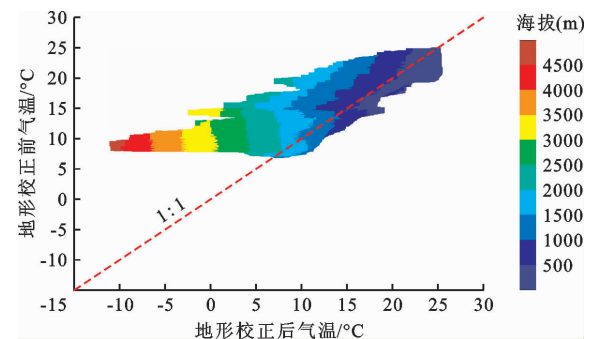


图 3 不同海拔时地形校正前后气温的散点关系 (以 05-15T12:00 为例)

按照 500 m 梯度划分海拔范围, 绘制各梯度地形校正前后的气温差值箱形图 (校正前减去校正后气温)。如图 4 所示。

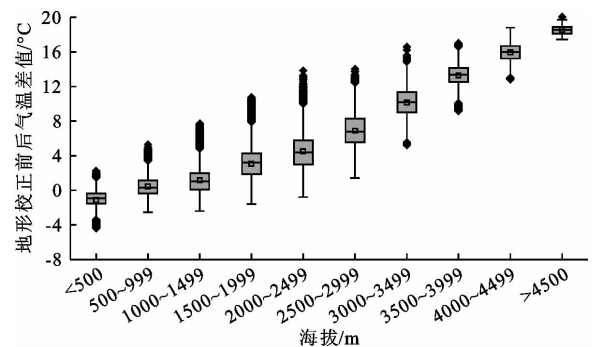


图 4 不同海拔下地形校正前后气温差值对比 (以 05-15T12:00 为例)

由图4可看出,随着海拔升高,地形校正前后气温的差值不断增大,且两者大致呈线性关系。当海拔低于1500 m时,地形校正前后的气温差值小于2℃;当海拔超过1500 m后,地形校正前后气温的差值越来越大;当海拔超过3500 m后,地形校正前后气温的差值甚至超过10℃。可见,气温空间插值结果考虑地形校正与否存在明显差异,当海拔超过一定值以后(如1500 m),地形校正前后的气温插值结果差异逐渐增大。

3.2 日尺度

为探讨地形在日尺度上对气温空间插值结果的影响,绘制5月份地形校正前后日平均气温的小提琴统计图,如图5所示,由图5可看出,5月份日平均气温经地形校正后均有明显下降,且地形校正后的气温变化范围明显大于校正前的气温,这与瞬时尺度研究结果相一致。

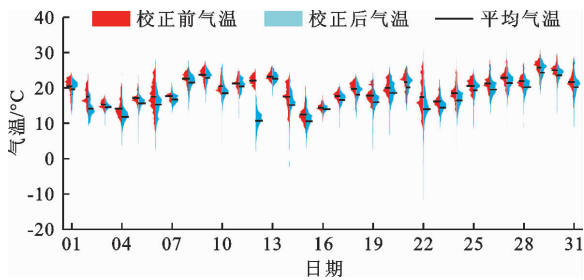


图5 2021年5月地形校正前后日平均气温的小提琴统计图

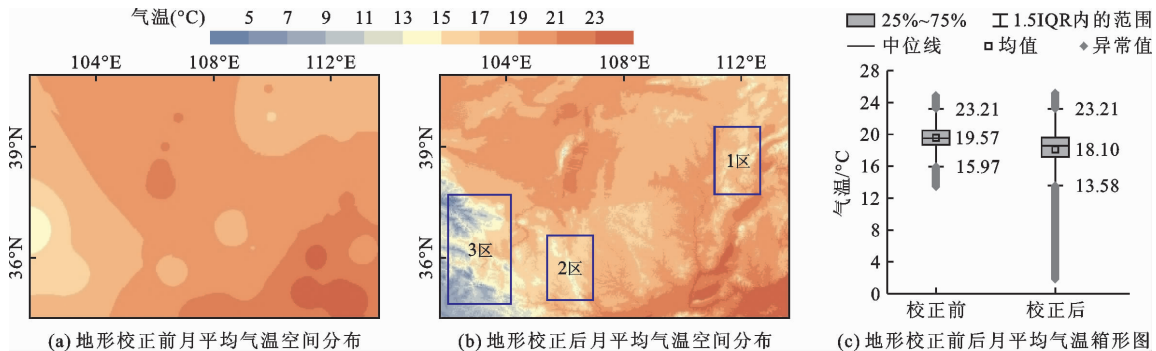


图7 研究区2021年5月地形校正前后月平均气温的空间分布云图及箱型图

对比图7(a)与7(b)可知,地形校正后的气温除了海拔较低的河谷地区外,其余地区均有明显下降,特别是海拔较高的吕梁山地区(1区)、六盘山地区(2区),校正后的气温下降超过4℃,而青藏高原地区(3区)甚至超过10℃。研究表明,不同的空间插值方法一般会导致气温出现约0.5℃的误差^[38]。而对于本文的整个研究区而言,地形校正前后的5月份月平均气温分别为19.57和18.10℃,地形校正后气温下降了约1.5℃,因此,为降低空间插值结

果的误差,需要考虑地形特别是海拔的影响。综上所述,在小时、日、月3种时间尺度下,考虑地形校正与否的气温空间插值结果存在明显差异,且地形校正前后的气温差值随着海拔的增加而不断增大。

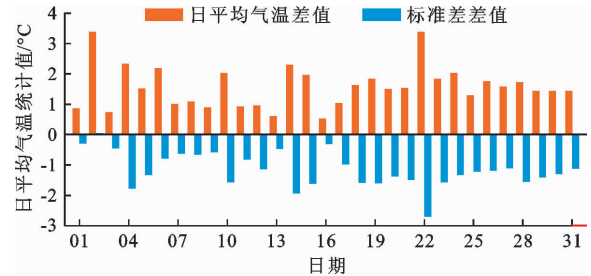


图6 2021年5月地形校正前后日平均气温差值指标变化

3.3 月尺度

为了探讨在月尺度上地形校正前后气温的空间插值结果如何分布,将2021年5月份月平均气温插值到1 km的空间分辨率,并利用1 km SRTM数字高程数据(DEM)对气温插值结果进行校正,分别得到地形校正前后的月平均气温空间分布云图及箱形图,如图7所示。

果的误差,需要考虑地形特别是海拔的影响。

综上所述,在小时、日、月3种时间尺度下,考虑地形校正与否的气温空间插值结果存在明显差异,且地形校正前后的气温差值随着海拔的增加而不断增大。

4 讨论

4.1 插值尺度对气温空间插值结果的影响

4.1.1 插值空间尺度对气温插值结果的影响 为

探讨不同插值尺度对气温插值结果的影响,选择 2021 年 5 月 15 日 12:00 这一时刻研究区内的 33 个国家气象站点的气温,利用反距离权重法分别将气温插值至 30 m 和 1 km 的空间分辨率,并将两者的

插值结果进行对比分析。

图 8 展示了该两个插值空间尺度下研究区的气温空间分布插值结果,表 1 为两种空间分辨率气温插值统计结果。

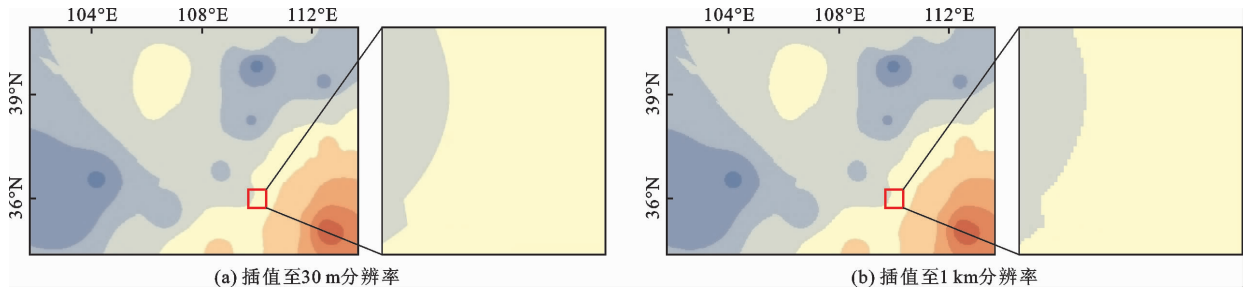


图 8 30 m 和 1 km 插值尺度下研究区气温空间分布的插值结果(以 05-15T12:00 为例)

表 1 两种空间分辨率气温插值的统计结果 °C

插值空间尺度/m	平均值	最大值	最小值	标准差
30	12.93	24.70	7.40	2.74
1000	12.93	24.69	7.40	2.73

图 8 表明,两种空间尺度的插值结果均具有典型的“牛眼”现象,且在空间分布上,两种空间尺度的插值结果无明显差异。但从插值结果局部放大图上看,气温插值到 30 m 的空间分布更为光滑连续,而气温插值到 1 km 的空间分布图则更为粗糙,可见 30 m 插值的空间连续性更好;由表 1 可以看出,两种空间分辨率插值结果的平均值、最大值、最小值以及标准差均无明显差异。

上述结果表明,插值尺度越精细则气温插值结果的空间连续性越好,对精细化研究地形对气温空间插值结果的影响更为有利。然而对于大尺度流域的研究而言,1 km 尺度的插值结果平滑掉了一些峰值和差异信息^[39],使得空间精细程度变差,但在数值上与 30 m 尺度的空间插值结果差异不大,且减少了数据处理工作量。可见在气象站点一定的情况下,插值结果的精度不能依靠提高插值空间分辨率来实现,如在空间尺度由 10 km 降至 100 m 的过程

中,提高插值空间分辨率并不能显著降低气温空间插值的误差^[40]。相似结论在水文领域也有报道,即当空间插值尺度达到一定阈值时,进一步提高插值分辨率对于降低雨量插值结果的误差作用并不明显^[41-42],某些精细空间尺度反而会显著降低数据处理的效率^[43]。

4.1.2 插值时间尺度对气温插值结果的影响 从本文研究结果来看,地形显著影响不同时间尺度下气温空间插值的结果,但在小时、日、月 3 种不同时间尺度下的影响却不完全一致。

图 9 显示了 2021 年 5 月在小时、日、月尺度下研究区所有地形校正前后的气温差值与 SRTM 海拔关系散点图。由图 9 可知,小时、日、月尺度下气温差值与海拔线性关系的斜率分别为 0.004 0、0.003 7、0.002 7,表明随着时间尺度从逐时到逐日、逐月变化,地形对气温空间插值结果的影响有弱化趋势。这可能是因为对气温进行平均后,降低了气温之间的差异^[37]。

4.2 海拔对气温空间插值结果的影响

本节以 5 月 15 日白天平均气温数据为例(如图 10 所示),分析地形(海拔)校正与否对气温插值结果空间特征的影响。

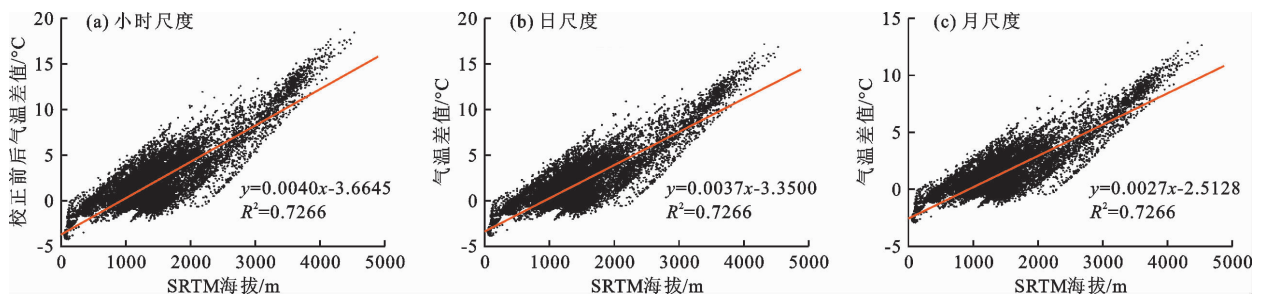


图 9 不同时间尺度下地形校正前后气温差值与海拔关系散点图

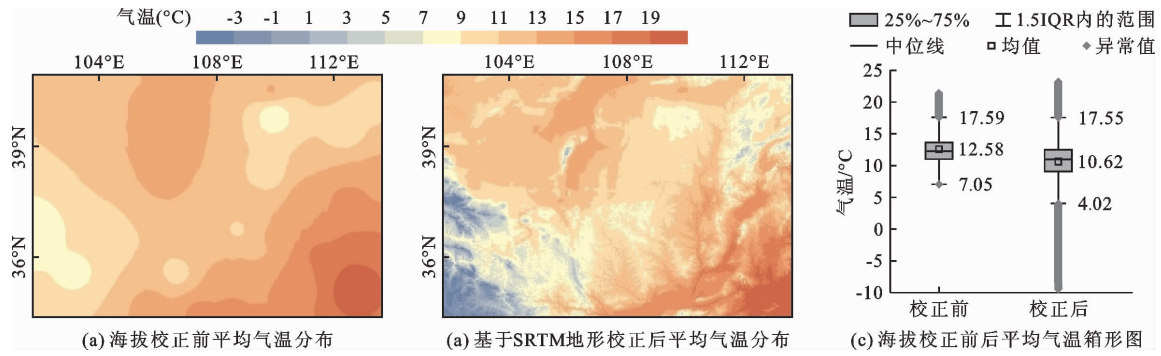


图10 研究区2021年5月15日白天地形校正前后的气温插值空间分布云图及箱型图

图10(a)、10(b)表明,地形校正前的气温空间插值结果存在明显的“牛眼”现象,难以直观体现气温空间分布的异质性。经地形校正后“牛眼”现象消失,气温空间插值结果较好地反映了气温与海拔的关系。即低温区主要出现在海拔较高的区域,如青藏高原、六盘山地区等,而海拔较低的区域则气温较高,说明校正后的气温空间插值结果较为真实。

前人研究表明,反距离权重法会产生明显的“牛眼”现象,这是因为该方法在气温插值的过程中只考虑样本点与目标点的距离,插值结果过分依赖于样本点,导致其插值结果容易受极值影响,经常会出现某一点的值高于周围的值的现象^[21]。而考虑海拔的气温插值方法得到的气温空间插值结果不仅能明显降低气温空间插值的误差,还能够明显地反映出海拔与气温之间的关系^[44],直观地反映出气温空间插值结果的空间异质性,这一结论与本研究结果相一致。

从图10(c)气温空间插值箱形图可知,在日尺度上基于SRTM数据地形校正后的日平均气温比校正前下降约2.0℃。但在海拔较高的区域,特别是青藏高原地区,日平均气温下降均在10℃以上。将图10(c)中地形校正前后气温的特征值统计列于表2,结果显示气温地形校正前后的平均值相差约2℃,且校正前后数据的最小值、标准差均存在明显差异,最小值差值为16.44℃,标准差差值为1.61℃,独立样本 t 检验结果进一步表明在0.05水平下校正前后数据有显著差异。

表2 研究区日尺度地形校正前后气温特征值统计结果

气温类型	平均值/℃	最大值/℃	最小值/℃	标准差
校正前气温	12.58	21.44	7.04	2.44
校正后气温	10.62	23.21	-9.40	4.05

以上结果表明海拔对气温空间插值结果具有重

要影响,即海拔越高对气温空间插值结果的影响越大。但还需要深入研究其他因素(如站点稀少等原因^[45])对气温空间插值的影响。

4.3 不同海拔梯度对气温空间插值结果的影响

为进一步分析地形对气温空间插值结果的影响,将研究区海拔以250m为间隔进行分区,得到分区后小时、日、月3种时间尺度所对应的地形校正前后气温差值(校正前减去校正后)的平均值,如图11所示。

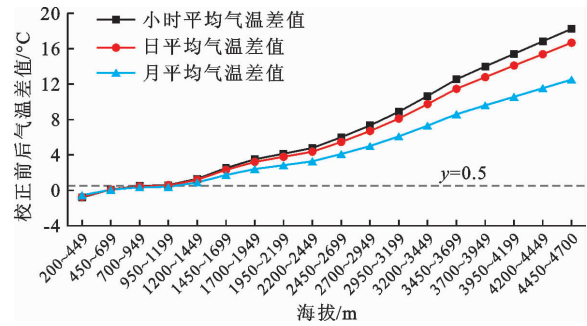


图11 不同时间尺度下地形校正前后气温差值与海拔梯度的关系

图11显示,3种时间尺度下,地形校正前后气温差值的平均值随着海拔的增加而显著增大。文献[38]中指出,不同的空间插值方法一般会导致气温出现约0.5℃的误差,由图11可知,3种时间尺度下地形校正前后气温差值的平均值超过0.5℃时所对应的海拔分别为1041、1040、1116m,均在1000m左右。值得注意的是,当海拔梯度在200~449m时,存在逆温现象,即校正后的气温随海拔的升高反而下降。逆温现象主要发生在平原或低海拔区域的山区(海拔<400m),这与前人的研究结果相一致^[46]。

在本研究区,随着海拔高度的增加,气温校正前后的差异越来越显著,已有研究发现气温与海拔高度间呈极显著负相关关系,即随着海拔升高气温明显降低^[47-48],并且,在高海拔地区,基于DEM校正

后的气温均有明显下降,且精度更高。例如,占龙飞等^[49]用不同插值方法对地势复杂、异质性高的江西省年平均气温进行插值发现,与传统插值方法(克里金插值法)相比,基于DEM校正后的年平均气温最小值由17℃降至9℃;聂欣等^[50]以地形起伏较大的广西壮族自治区河池市为研究区,利用DEM数据分析山区气温,发现地形校正前后的1月多年平均气温的最小值由7.45℃降低至3.14℃;另外,张蕾等^[51]对山东省多年平均气温进行空间插值发现,在鲁中山地及胶东丘陵海拔较高的地区,地形校正后的气温下降最为显著。可见,海拔校正与否显著响应气温插值精度。本研究进一步将不同海拔对气温空间插值结果的影响进行系统量化,得出海拔高度每增加1000m,校正后的气温下降约4℃,表明在对气温进行空间插值时,特别对高海拔地区而言,必须校正海拔的影响。

在本研究中发现,当海拔超过1000~1100m时,地形校正前后的气温空间插值结果差异超过0.5℃(地形校正前数值偏高);海拔在2000m时,小时、日尺度下校正前后差异达到4℃,月尺度下的差异也有3℃左右;海拔在3000m时,小时、日尺度下这种差异甚至会达到8℃,虽然月尺度下的这种差异会有所降低,但也达到了6℃。李军等^[52]对全国月平均气温插值空间分布的研究结果亦表明,地形对气温的影响主要是海拔较高的西部地区。可见在黄土高原地区,地形对气温插值结果的影响主要在高海拔区,对低海拔区域的影响较小。

在探讨地形对气温空间插值结果的影响时,本文只展示了研究区2021年5月份在逐时、日、月尺度的结果,但其他月份的情况与5月份相似,均表现为地形起伏大的区域则气温地形校正前后的差异明显(超过0.5℃),且随着海拔的增加,这种差异随之增大。

本文主要考虑了影响气温空间插值结果最显著的要素——海拔,其他因素如坡度、坡向等也会对气温空间插值的结果产生影响^[53-54],未来可综合考虑这些因素,进一步研究并提高复杂地形起伏地区气温空间插值的精度。

5 结论

为了准确获取地形起伏地区气温空间数据,本文基于1km SRTM数据,分别从小时、日、月3种时间尺度,开展了不同海拔高度地形校正前后气温空间插值结果的研究,得出如下结论:

(1)在小时、日、月3种时间尺度上,考虑地形校正与否的气温空间插值结果存在明显差异,且地形校正前后的气温差异会随着海拔高度的增加而增大。在本研究区,当海拔超过1000m时,地形校正前后气温差异平均为0.5~16℃,超过气温插值可接受的误差(0.5℃),气温插值应用中需要考虑地形的影响。

(2)随着时间尺度从逐时到逐日、逐月的变化,地形对气温空间插值结果的影响逐渐减弱。

(3)将气象站点的气温数据分别插值到30m与1km两种空间尺度上,前者在空间连续性上优于后者,即气温插值空间分辨率越高,空间连续性越好。

参考文献:

- [1] 陆琦,邱新法. 基于GIS的月平均气温空间化方法的比较研究[J]. 科技通报, 2017, 33(3): 43-48.
- [2] 聂磊,舒红,刘艳. 复杂地形地区月平均气温(混合)地理加权回归克里格插值[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10): 1553-1559.
- [3] 王丽,王培法,刘爱利,等. 基于DEM的江苏气温空间插值研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2015, 7(1): 79-85.
- [4] 张景华,封志明,姜鲁光,等. 澜沧江流域植被NDVI与气候因子的相关性分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1425-1435.
- [5] 王强,张廷斌,易桂花,等. 横断山区2004-2014年植被NPP时空变化及其驱动因子[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [6] MENG Fandong, JIANG Lili, ZHANG Zhenhua, et al. Changes in flowering functional group affect responses of community phenological sequences to temperature change[J]. Ecology, 2017, 98(3): 734-740.
- [7] 刘盼,赵西宁,高晓东,等. 黄土高原极端气温变化特征及其与平均气温的相关性[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1975-1982.
- [8] 刘荔昀,鲁瑞洁,丁之勇,等. 黄土高原气候变化特征及原因分析[J]. 地球环境学报, 2021, 12(6): 615-631.
- [9] 苟娇娇,王飞,金凯,等. 黄土高原植被恢复引发区域气温下降[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3970-3978.
- [10] 贺倩,汪明,刘凯. 基于机器学习的气温要素空间插值[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 733-748.
- [11] 李叶,张艳红,陈子琦,等. 中高纬度山区气温空间化的方法比较研究——以大兴安岭北麓为例[J]. 山地学报, 2021, 39(2): 174-182.
- [12] 赵建,任周鹏,王劲峰,等. 1961-2013年东北与华北气温变化速度空间差异[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(7): 909-914.

- [13] 陈冬花, 邹陈, 王苏颖, 等. 基于 DEM 的伊犁河谷气温空间插值研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1925 - 1929.
- [14] 蔡迪花, 郭锐, 李崇伟. 基于 DEM 的气温插值方法研究[J]. 干旱气象, 2009, 27(1): 10 - 17 + 28.
- [15] 武鹏飞, 张钧泳, 谭娇, 等. 基于 DEM 修订的新疆区域气温空间插值精度优化研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(2): 108 - 114.
- [16] 沈红, 刘文兆, 张勋昌. 黄土高原气象要素栅格化方法的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 99 - 106 + 114.
- [17] 李佳霖, 樊子德, 邓敏. 基于空间异质分区的残差 IDW 插值方法[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(5): 25 - 29.
- [18] 李海涛, 邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(7): 1 - 8.
- [19] 易桂花, 张廷斌, 何奕萱, 等. 四种气温空间插值方法适用性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 115 - 128.
- [20] 彭彬, 周艳莲, 高苹, 等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 539 - 548.
- [21] 马秀霞, 黄领梅, 沈冰. 陕西省月平均气温空间插值方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 100 - 105.
- [22] STAHL K, MOORE R D, FLOYER J A, et al. Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 139(3-4): 224 - 236.
- [23] 曾燕, 邱新法, 何永健, 等. 复杂地形下黄河流域月平均气温分布式模拟[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2009, 39(6): 774 - 786.
- [24] 王智, 师庆东, 常顺利. 新疆地区平均气温空间插值方法研究[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 201 - 208.
- [25] 王雅舒, 李小雁, 石芳忠, 等. 退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发[J]. 科学通报, 2019, 64(Z1): 588 - 599.
- [26] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3960 - 3968.
- [27] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46: 234 - 240.
- [28] 朱选, 刘素霞. 地理信息系统原理与技术[M]. 上海: 华东师范大学出版, 2006.
- [29] BABAK O, DEUTSCH C V. Statistical approach to inverse distance interpolation[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2009, 23: 543 - 553.
- [30] 刘光孟, 汪云甲, 张海荣, 等. 空间分析中几种插值方法的比较研究[J]. 地理信息世界, 2011, 9(3): 41 - 45.
- [31] 孙和平, 罗少聪. 中国及其邻区地表气象数据预处理和网格化数值结果分析[J]. 大地测量与地球动力学, 1998, 18(3): 53 - 58.
- [32] 刘伟刚, 张东启, 柳景峰, 等. 喜马拉雅山中段地区气温直减率变化特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 240 - 245.
- [33] 周礼华, 黄力, 钱深华, 等. 金佛山西坡气温的垂直变化特征[J]. 山地学报, 2019, 37(6): 818 - 827.
- [34] 彭焕华, 赵传燕, 梁继. 黑河上游高寒草地蒸散发日变化及其影响因子分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 46 - 53.
- [35] 韩红珠. 黄土高原植被物候和净初级生产力(NPP)的关系及其对气候变化的响应[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [36] 雷俊, 姚玉璧, 孙润, 等. 黄土高原半干旱区物候变化特征及其对气候变暖的响应[J]. 中国农业气象, 2017, 38(1): 1 - 8.
- [37] 吴瑞芬, 霍治国, 曹艳芳, 等. 内蒙古典型草本植物春季物候变化及其对气候变暖的响应[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1470 - 1475.
- [38] ROBESON S M. Influence of spatial sampling and interpolation on estimates of air temperature change[J]. Climate Research, 1994, 4: 119 - 126.
- [39] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 261 - 277.
- [40] 何鹏, 张媛, 高文波, 等. 四川省多年平均气温数据空间插值方法与影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(9): 114 - 124.
- [41] 张海筱, 马金辉. 石羊河流域祁连山区基于地形因子的降水面域化处理[J]. 甘肃科学学报, 2014, 26(1): 27 - 30.
- [42] 潘永地. 温州地区面雨量的多尺度最优插值方法研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2003.
- [43] CHEN Yangbo, LI Ji, WANG Huanyu, et al. Large-watershed flood forecasting with high-resolution distributed hydrological model[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2017, 21: 735 - 749.
- [44] 王丽, 王培法, 杨珊珊, 等. DEM 数据对气温插值精度的影响分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 485 - 488.
- [45] MA Jianyong, DONG Wenjie, WEI Zhigang, et al. Evaluating daily surface maximum temperature interpolation error by adding climate stations near border areas over China[J]. International Journal of Climatology, 2014, 35(10): 2798 - 2808.
- [46] 王晓明, 云天, 张智勇, 等. 吉林省冬季逆温天气特征分析[J]. 气象, 2009, 35(8): 91 - 97.

(下转第 32 页)

- 格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165-174.
- [3] 陈星任, 杨岳, 何佳男, 等. 近60年中国持续极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 2068-2081.
- [4] 刘裕辉, 刘惠英, 卢怡诗. 赣江上游章水流域极端降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2): 65-73+80.
- [5] 贺冰蕊, 翟盘茂. 中国1961-2016年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 437-444.
- [6] 卢珊, 胡泽勇, 王百朋, 等. 近56年中国极端降水事件的时空变化格局[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 683-693.
- [7] 薛媛, 薛晓萍. 极端降水与干旱同步频发的研究进展[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(1): 61-73.
- [8] 谭畅, 孔锋, 郭君, 等. 1961-2014年中国不同城市化地区暴雨时空格局变化——以京津冀、长三角和珠三角地区为例[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 132-140.
- [9] 张正涛, 崔鹏, 李宁, 等. 武汉市“2016.07.06”暴雨洪涝灾害跨区域经济波及效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 433-441.
- [10] 周月华, 彭涛, 史瑞琴. 我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 494-501.
- [11] 符娇兰, 马学款, 陈涛, 等. “16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. 气象, 2017, 43(5): 528-539.
- [12] 陈勇, 吴雨蒙. 突发自然灾害事件中的网络舆情时空演化分析——以新浪微博“郑州7·20特大暴雨”事件为例[J]. 声屏世界, 2022(3): 8-12.
- [13] 温家洪, 董强. 风险管理人人有责: 郑州暴雨灾难的启示[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 752.
- [14] 曹经福, 杨艳娟, 郭军, 等. 天津市短时暴雨雨型时空分异及其对城市内涝的影响[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 114-121.
- [15] 赵海军, 曹洁, 潘玲, 等. 2007-2019年山东省短时强降水时空分布特征[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(2): 149-155.
- [16] 刘媛媛, 郑敬伟, 刘洪伟, 等. 极端大暴雨对城市防洪的警示和思考[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 21-24.
- [17] 卢书梅, 杨传国, 谷黄河. 1959-2018年山东省降水时空分布特征与洪旱演变规律[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 60-66.
- [18] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报, 2013, 71(3): 367-382.
- [19] 韩函, 吴昊旻, 黄安宁. 华北地区夏季降水日变化的时空分布特征[J]. 大气科学, 2017, 41(2): 263-274.
- [20] 周玉都, 许敏, 赵玮, 等. 2005-2019年河北省小时降水时空分布特征[J]. 气象科技, 2021, 49(6): 885-896.
- [21] 苗运玲, 宫恒瑞, 王健, 等. 2012-2019年乌鲁木齐市夏季降水日变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1222-1230.
- [22] 王颖, 刘丹妮, 张玮玮, 等. 2004-2016年浙江省夏季降水的日变化特征[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 1-9.
- [23] 杜亮亮, 周雪英, 赵有谱, 等. 河北邯郸地区极端降水指数气候特征及其与降水量、气温的关系[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 968-974+1003.
- [24] 侯淑梅, 孙敬文, 孙鹏程, 等. 基于加密自动气象观测站和国家气象观测站的山东省极端短时强降水时空分布特征的对比分析[J]. 气象, 2020, 46(2): 200-211.
- [25] 张功文, 董方亮, 谢祥永. 基于区域自动站资料的邯郸市夏季短时强降水分布研究[J]. 现代农业科技, 2016(14): 205-207+220.

(上接第24页)

- [47] 杨凤海, 郭欣欣, 高凤杰, 等. 基于DEM聚焦分析的旬平均气温与地面高程的相关性定量研究[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(6): 37-40.
- [48] 袁淑杰, 谷晓平, 缪启龙, 等. 基于DEM的复杂地形下平均气温分布式模拟研究——以贵州高原为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 859-867.
- [49] 占龙飞, 张传江, 胡菊芳, 等. 基于DEM的复杂地形气温空间插值研究[J]. 气象与减灾研究, 2018, 41(1): 57-62.
- [50] 聂欣, 吴良林, 赵玲. 利用DEM数据分析山区气温[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(5): 2187-2188.
- [51] 张蕾, 刘晓, 马占山. 基于温度梯度修正的气温插值方法研究——以山东省为例[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3055-3057.
- [52] 李军, 游松财, 黄敬峰. 中国1961-2000年月平均气温空间插值方法与空间分布[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 109-114.
- [53] 游松财, 李军. 海拔误差影响气温空间插值误差的研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 140-144+157.
- [54] SUN Ranhao, ZHANG Baiping. Topographic effects on spatial pattern of surface air temperature in complex mountain environment[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 621.